

УДК 004.023, 519.147

Алгоритмы размещения изделий в цеху формовки

Ермаков А.В., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра «Компьютерные системы автоматизации производства»*

*Научный руководитель: Хоботов Е.Н., д.т.н., профессор
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
gss@bmstu.ru*

Постановка задачи

Завод железобетонных изделий выпускает стандартную продукцию с учетом рыночного спроса и нетиповые изделия по индивидуальным заказам. В настоящий момент на заводе не применяются автоматизированные системы планирования, трудоемкие расчёты выполняются вручную, и в них закладываются риски, увеличивающие сроки выполнения заказов. И вместе с этим отсутствие точной информации о сроках поставки заказа приводит к тому, что завод теряет выгодные заказы, которые берут конкуренты.

Для решения этой проблемы предлагается разработать систему планирования [1], в которую входят модули управления заказами, построения расписаний и размещения изделий в цеху формовки. Система даст ответ на вопросы, возможно ли выполнение заказа к указанной дате, и когда именно возможно выполнить данный заказ. Четкое планирование работ на заводе даст возможность размещать дополнительные заказы без ущерба уже принятым заказам, и вовремя выполнять все заказы, а также в целом сформирует репутацию завода как надежного производителя и поставщика продукции.

В основе работы системы планирования лежит алгоритм формирования групп, который решает следующую задачу: пусть $X = \{x_1, x_2, \dots, x_E\}$ — выборка изделий из текущего портфеля заказов; изделие x_i имеет площадь $s(x_i)$ и каждому изделию присвоен индивидуальный рейтинг $r(x_i)$. Необходимо для всего портфеля заказов сформировать группы изделий таким образом, чтобы при условии максимальной плотности размещения суммарный рейтинг изделий R был наибольшим из всех вариантов размещения изделий.

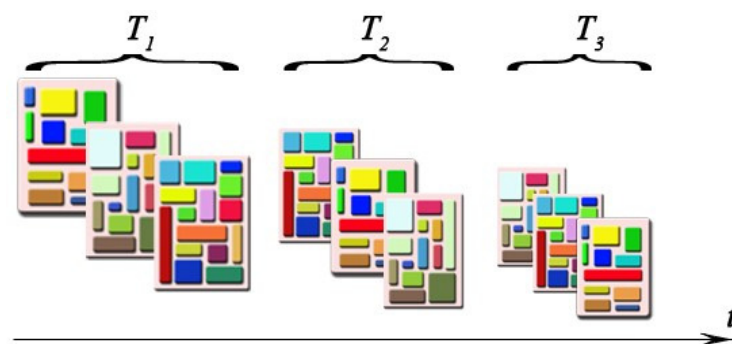


Рис. 1. Группы изделий на участке формовки

Производственный процесс представлен как множество групп изделий, сменяющих друг друга во времени и обрабатываемых последовательно. Сначала из арматуры изготавливают каркасы изделий и размещают формы изделий на участке формовки. Затем в размещенные формы заливают бетонный раствор и выполняют операцию виброусадки. И после набора достаточной твердости изделие извлекают из формы и перемещают в цех окончательной сушки, а после проверки качества – на склад готовой продукции.

Описание системы

I. Модуль управления заказами является наиболее важной частью системы планирования. При поступлении нового заказа директору завода нужно оценить срок его выполнения, а если заказ выгодный, то этот срок должен быть максимально коротким. Для этого нужно учесть не только сроки заказов, уже взятых в производство, но и множество других факторов, таких как, например, наличие необходимых материалов, а при их отсутствии заранее заказать материалы у поставщиков. Или в случае срочного заказа организовать работу в две или три смены. Такую оценку возможно выполнить вручную, но она будет очень грубой. Для получения точной и достоверной информации нужна автоматизация таких расчётов, чтобы исключить неоправданно завышенные сроки.

Итак, модуль управления заказами выполняет следующие функции:

- регистрирует заказы на производство;
- регистрирует внутренние заказы на закупки сырья и материалов;
- управляет выполнением заказов с учётом их приоритетов;
- формирует отчёты по объёму и стоимости работ.

Среди заказов можно выделить срочные и приоритетные, обычные и производство на склад с учётом спроса. Обычный заказ выполняется в порядке общей очереди. Выполнения приоритетного заказа происходит без очереди и возможно использование

материалов, заготовленных для других заказов. А в срочный заказ при необходимости



Рис. 2. Управление заказами

комплектуются готовые изделия, предназначенные для выполнения других заказов.

Для учёта этих особенностей и для выбора изделия на отдельных операциях в алгоритме приоритет заказа преобразовывается в количественную характеристику в виде *рейтинга* изделия, который учитывает не только приоритет заказа, но и плановый срок изготовления, и прибыль в результате выполнения заказа. А также учитывается, как долго выполняется заказ, был ли он отложен, есть ли в наличии необходимые материалы и сырьё, а также убытки в результате отмены заказа или нарушения срока поставки (финансовые и репутационные, в том числе).

II. Модуль составления расписания определяет последовательность выполнения всех операций производственного процесса и времени их начала и завершения. Основной операцией является заливка и усадка бетона. Это узкое место производственной системы как с точки зрения возможностей оборудования и ограничений физическими особенностями процессов затвердевания бетона с одной стороны, так и с точки зрения управления процессами основного и подготовительного производства с другой стороны. И поэтому необходимо согласовать:

- контроль и заказ необходимого количества сырья и материалов;
- изготовление арматурного каркаса изделия;
- проверку форм для заливки бетона, ремонт или замену при необходимости;
- подготовку бетонного раствора на бетономесительном узле;
- размещение форм изделий на рабочей площади цеха;
- время заливки бетона и виброусадки, и сушку и контроль качества изделия.

Длительность операции состоит из основного и подготовительно-заключительного времени: $T = t^{оч} + t^{п-з}$. В основное время $t^{оч}$ входит выполнение заливки бетона и <http://sntbul.bmstu.ru/doc/585889.html>

длительность процесса усадки. Подготовительно-заключительное время t^{n-3} состоит из времени для размещения форм и времени для перемещения готовых изделий. Так как изделия массивные и допустимая скорость перемещения балочного крана ограничена, то величину t^{n-3} обязательно нужно учитывать при составлении расписания.

Более наглядно данную операцию можно изобразить следующим образом (рис. 3). На плоскости XOY отмечаем площадь опоры изделия, а по оси Z – длительность операции заливки и усадки бетона с учётом перемещения форм и готовых изделий: $T = t^{оч} + t^{n-3}$. Тогда по доле занятого объема на такой диаграмме можно судить об эффективности организации производственного процесса.

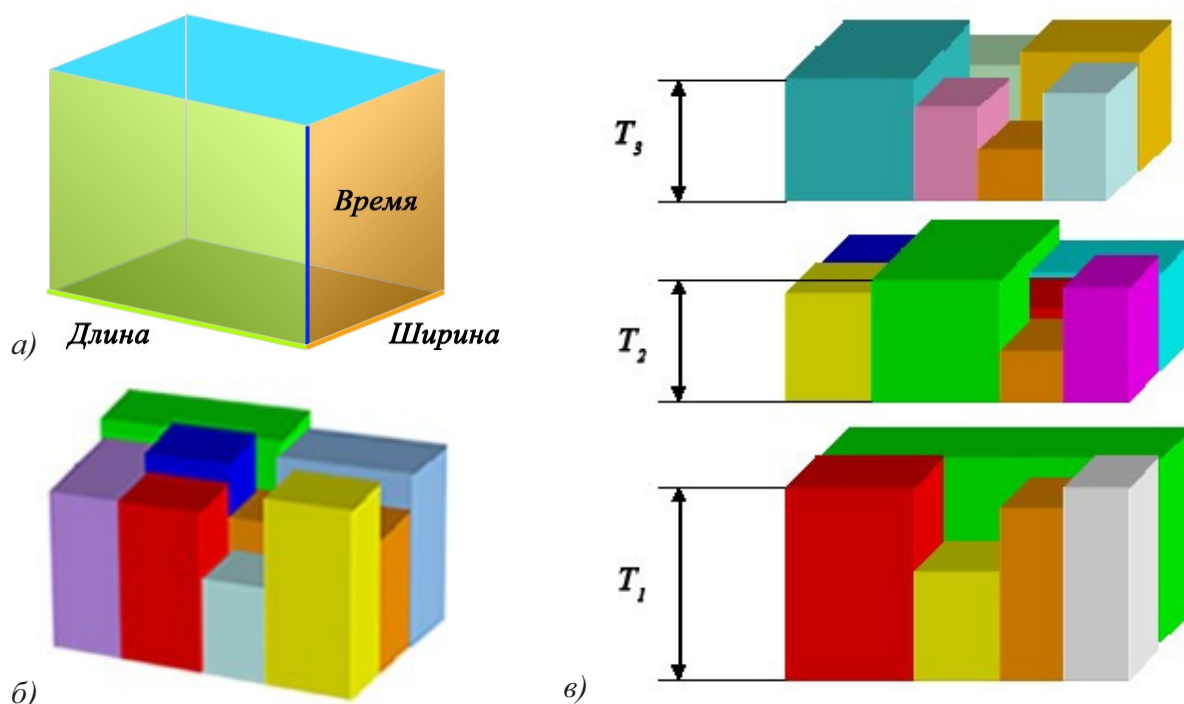


Рис. 3. Трехмерное представление операции: а) для одного изделия; б) для группы изделий; в) для нескольких групп изделий

Данный подход описан в публикациях и применяется в разных задачах планирования и распределения ресурсов, например, для составления расписаний при оптимизации работы кластеров [2, 3]. Таким образом, задача составления расписаний может быть переформулирована как задача параллелепипедной упаковки блоков, алгоритмы решения которых рассмотрены в [4, 5, 6, 7]. В отличие от задачи упаковки грузов в данной задаче нет необходимости исключать провисание вышележащих блоков, и вместе с тем, высота параллелепипеда не является фиксированной. Эти особенности открывают возможность использовать алгоритмы упаковки в полубесконечный контейнер или алгоритмы гильотинного раскроя, которые являются более простыми и в этом случае

представляют большой интерес для решения данной задачи.

Рассматриваемая задача является комбинаторной, и так как поиск оптимального решения за приемлемое время не представляется возможным в силу её большой размерности, это вызывает необходимость в приближенных методах решения. С помощью блочной модели, описанной в ряде работ [3, 8, 9], показано, как задачи прямоугольной (2DBP) и параллелепипедной (3DBP) упаковки сводятся к одномерной задаче (1DBP).

Изложенный подход на основе трехмерного представления операций и применения алгоритмов 3D-упаковки позволит использовать все производственные ресурсы максимально эффективно, а применение рейтинга изделий позволит полностью построить всю производственную программу с учётом приоритетов заказов. Однако на пути к этому возникают некоторые трудности. Например, если время затвердевания будет сопоставимо с подготовительно-заключительным временем, то может возникнуть конфликт ресурсов – балочный кран будет не в состоянии обслуживать все запросы без потери времени. Но даже с учётом этих потерь такое расписание будет лучше, чем предлагаемый "покадровый" подход, изображенный на рис. 1. В силу большой размерности поставленной задачи данное предположение трудно проверить аналитически. С другой стороны, нет возможности поставить эксперимент в реальных производственных условиях из-за его высокой стоимости. Поэтому для выполнения дальнейших работ в направлении 3D-упаковки необходимо разработать имитационную модель участка формовки и оценить загрузку балочного крана.

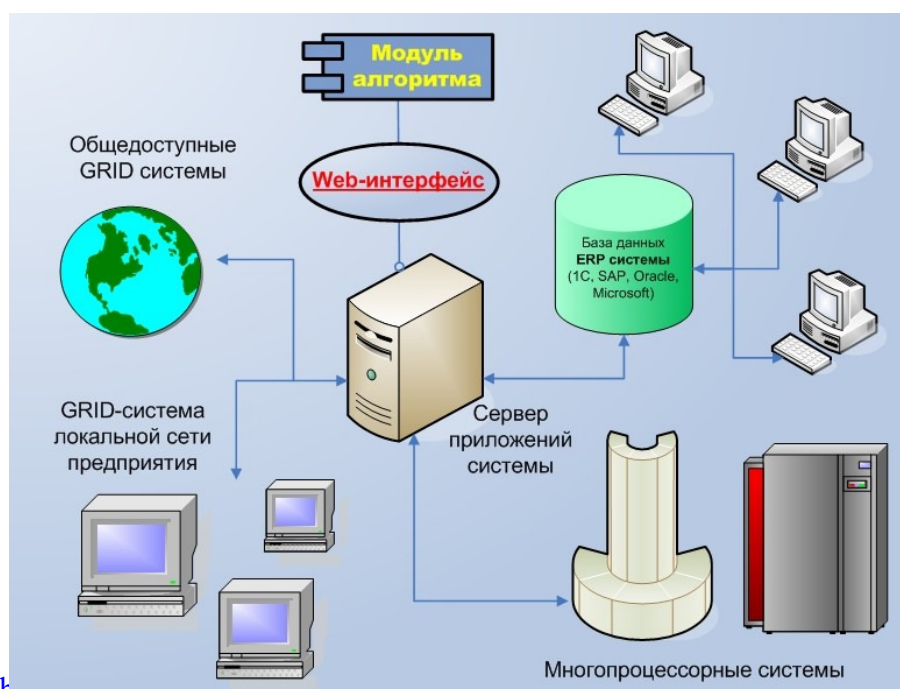


Рис. 4. Распределённая архитектура системы

В случае положительного результата такого исследования следует применять параллельные 3D-алгоритмы, так как расчёт полной производственной программы требует больших вычислительных ресурсов. Длительность расчёта важна как для модуля управления заказами, так и в ситуациях, связанных с оперативным перерасчётом производственной программы, например, в случае поломки оборудования или отмены текущего заказа. Для этого можно выполнять параллельные расчеты на отдельном многопроцессорном сервере, или распределено, на локальной сети завода (рис. 4).

III. Модуль формирования групп

В настоящий момент для разработки тестового прототипа системы планирования использован более простой "покадровый" подход, основанный на алгоритме формирования групп и на алгоритме геометрического размещения форм, которые реализованы в виде отдельных подпрограмм. Алгоритм размещения решает *2DBP*-задачу двумерной упаковки в контейнер. Несмотря на то, что эта задача имеет широкое практическое применение и вызывает постоянный интерес, существует не так много исследований по данной теме в силу высокой сложности данной задачи и большой трудоемкости вычислений, связанных с её решением [5]. Перспективным направлением является применение метаэвристических подходов, хорошо зарекомендовавших себя для решения комбинаторных задач из самых разных предметных областей. Среди существующих публикаций можно выделить работы ученых уфимской научной школы Э.А. Мухачевой [10, 11, 8]. Больше внимания уделяется алгоритмам упаковки в полосу, связанных с задачами раскроя. Мультиметодным эвристическим алгоритмам посвящены работы [12, 7], а в [13] глубоко исследованы методы локального поиска. Существуют работы с применением метода поиска с запретами [14, 15] и метода ветвей и границ [16].

В прототипе системы планирования реализована упаковка с помощью простых эвристик [17, с. 157-161], например, First Fit – «первый подходящий», и метода бинарного дерева [18], как показано ниже, на основе исходных кодов доступных в сети интернет [19].

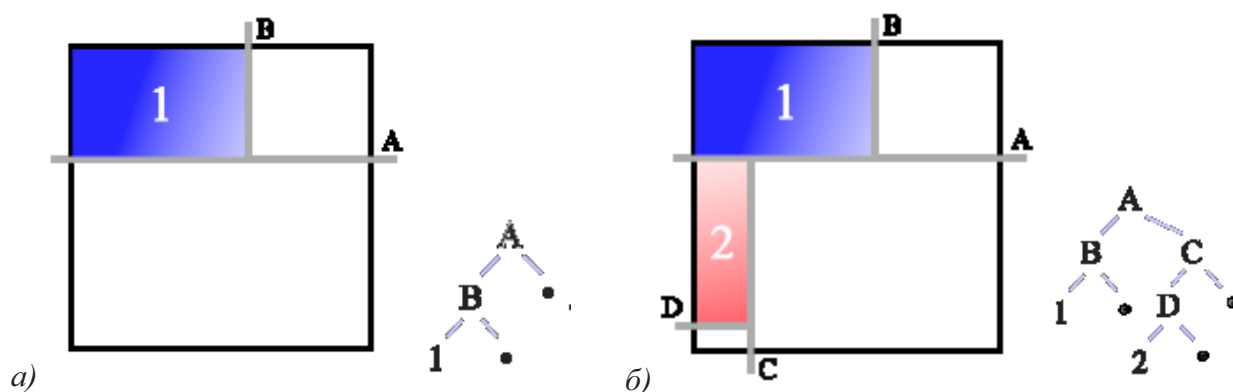


Рис. 5. Построение дерева поиска в пространстве решений:

а) начальное размещение; б) последующее размещение

Согласно [20, с. 596] и [17, с. 161] известна нижняя оценка: если предметы отсортировать по невозрастанию высоты, то даже в худшем случае решение будет отличаться от оптимального не более чем на 22%. Так как в реальных производственных задачах требуются большая точность, то вместе с такими эвристиками применяют специальные процедуры уплотнения [13, с. 8]. Намного лучшие результаты показывают метаэвристические алгоритмы, однако они сложнее в реализации, а для прототипа системы в тестовой версии можно использовать простые эвристические алгоритмы.

Задача управления заказами и согласования операций производственного процесса в первую очередь определяется работой модуля размещения изделий на рабочей площади цеха, но с учётом рейтинга изделий, который включает в себя информацию о плановом сроке заказа и непосредственно влияет на расписание операций. Поэтому при формировании группы изделий помимо геометрического критерия рассматривают рейтинг изделия. Но в общем случае удовлетворить двум критериям одновременно невозможно и алгоритм размещения усложняется и требует оригинального решения.

С одной стороны, если у изделий одинаковые рейтинги, то предпочтительно такое размещение, плотность которого максимальна: $\rho = \frac{1}{S} \sum_{x \in X'} s(x) \rightarrow \max$,

где X' – множество размещенных изделий из общей выборки X , $r(x_i) = r$.

Но с другой стороны, если при прочих равных условиях плотность размещения не изменяется, например, когда изделия обладают одинаковыми размерами, то лучшей будет такая группа изделий, суммарный рейтинг которых наибольший: $R = \sum_{x \in X'} r(x) \rightarrow \max$.

Алгоритм формирования групп устроен таким образом, что перед размещением форм выполняется сортировка изделий, чтобы определить, какие изделия следует выбрать первыми. При этом изделия меньшей площади с большим рейтингом обладают большей полезностью и такие изделия нужно включать в размещение в первую очередь. Поэтому сортировку следует выполнять по значению

$$p(x) = \frac{r(x)}{s(x)/S}, \text{ где } S - \text{площадь размещения.}$$

Вообще говоря, так как в цехе расположено оборудование и предусмотрены проходы, то полезная площадь меньше всей площади цеха и алгоритм упаковки должен учитывать эти области, как уже занятые. Далее

алгоритм вызывает подпрограмму размещения форм и затем вычисляется время обработки данной группы как максимальное время затвердевания бетона среди всех изделий группы. Те формы, которые не удалось разместить в этой итерации, возвращаются в исходную выборку, но с увеличенным рейтингом. Это сделано для того, чтобы изделия из приоритетных заказов были обработаны в первую очередь. Пересчёт рейтинга выполняется по следующей формуле:

$$r_{i+1} = \alpha \cdot r_i \cdot \frac{D - t_0}{D - t_i},$$

где в начальный момент времени $t_i = t_0$, а в конечный момент времени t_i принимает значение D . Коэффициент α используется для настройки алгоритма и выражает чувствительность изменения рейтинга. Таким образом, чем меньше осталось времени $\Delta = D - t_i$ от запланированного $\Delta_0 = D - t_0$, тем выше рейтинг изделия, и в пределе он устремляется к бесконечности. Именно поэтому такая формула гарантирует своевременное выполнение заказа и изготовление всех изделий при наличии всех материалов, достаточного персонала и исправного оборудования.

При формировании групп также важно учитывать длительность затвердевания бетона и при прочих равных условиях размещения форм предпочтение должно быть

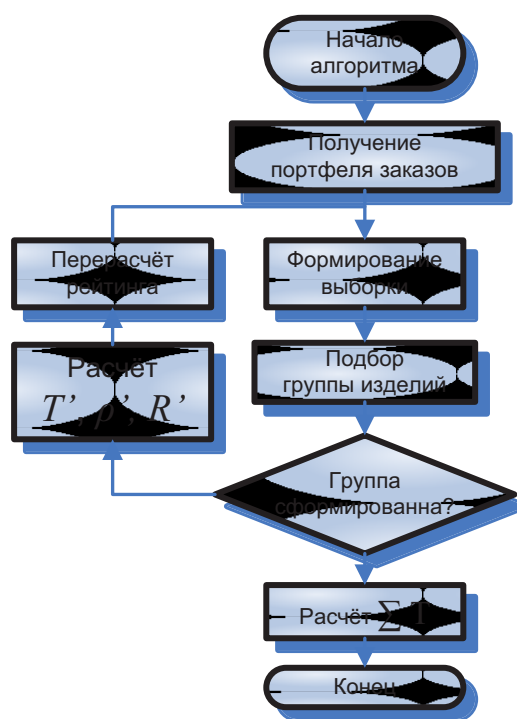


Рис. 6. Алгоритм формирования групп

отдано таким группам, суммарное время обработки которых меньше. Как видно на рис. 7, время обработки второй группы уменьшается на треть, а общее время – на 15%, и это только лишь за счёт оптимального подбора изделий. Одним из возможных решения является подбор групп таким образом, чтобы времена их обработки были кратными, и тогда можно будет освобождающуюся площадь использовать повторно.

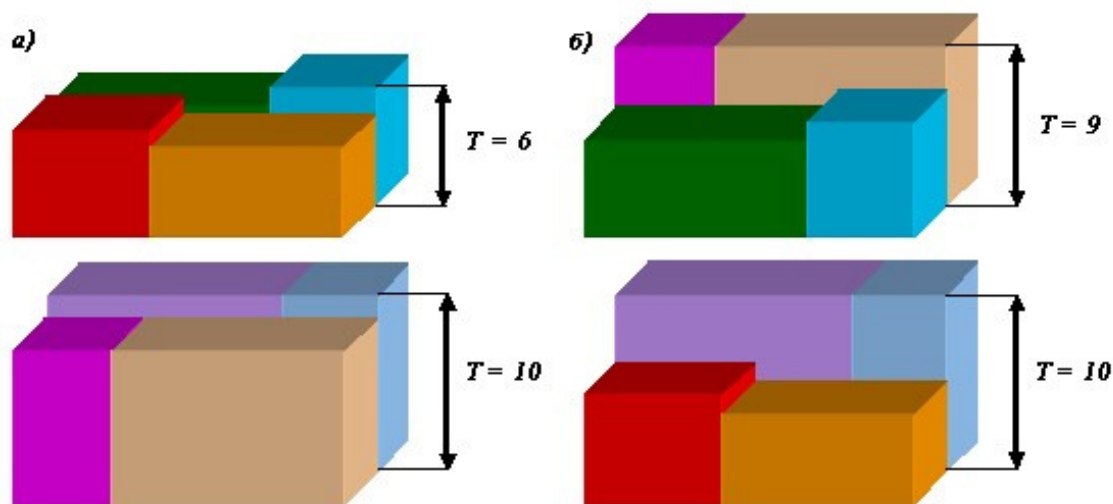


Рис. 7. Учёт длительности затвердевания бетона при подборе групп

Важно, что такие приемы не требуют капитальных вложений, не изменяют технологию производства, а только лишь за счёт подбора порядка выполнения операций позволяют значительно экономить и временные ресурсы при составлении расписаний, и материальные в случае задач раскроя, которые являются родственными задачам упаковки.

Разработка программы

Для проверки алгоритма и выполнения тестовых вычислений была разработана программа, реализующая основной алгоритм работы с изделиями, описанный на рис. 6. Результат работы с программой изображен на рис. 8. В тестовой версии программы не учитываются области цеха, запрещенные для размещения. Важно отметить, что точно такая же задача может быть сформулирована и для вибростола. Но в отличие от данной задачи вся поверхность стола является рабочей. Эта задача в статье не рассматривается, однако в дальнейшем их следует объединить и решать вместе.

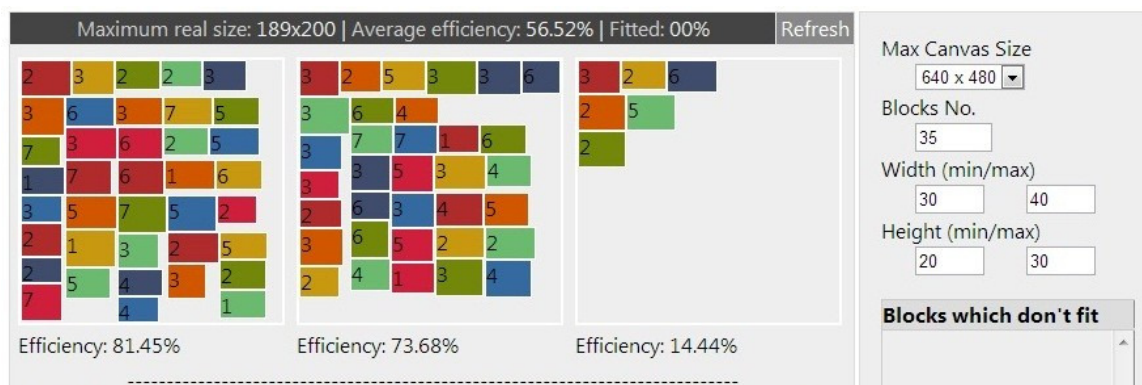


Рис. 8. Тестовый модуль размещения изделий в цеху формовки

Тестовый прототип алгоритма доступен в сети интернет на сайте BinPacking.narod.ru. Несколько алгоритмов упаковки были реализованы на языке программирования Java и JavaScript. И для их исследования разработан единый интерфейс реализации в программе, который изображен на рисунке 9. *Интерфейс* – это набор функций, которые обязательно должны быть реализованы в подпрограмме алгоритма, чтобы его можно было просто, быстро и удобно добавить в основную программу без её изменения. Основная среди этих функций – это `findCoords`, размещающая изделия из списка `Blocks`, и функция `getDimensions`, которая вычисляет величину площади, занятой всеми размещенными изделиями.

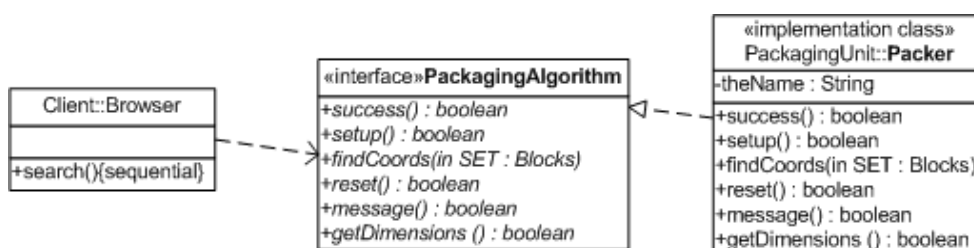


Рис. 9. Интерфейс алгоритма упаковки.

Для вызова программы, например, из модуля построения расписаний, реализованного в системе 1С Предприятие, или для использования модуля на многопроцессорном сервере, необходимо также разработать интерфейсы вызова функций программы, что позволит изменять и улучшать алгоритмы без изменения других модулей.

Исследование алгоритмов

Для проверки предложенной модели требуется сгенерировать тестовые данные. В связи с тем, что на заводе отсутствуют автоматизированные системы учета, оказалось невозможным оперативно получить статистические данные для выполнения тестовых вычислений. Вместо этого был разработан отдельный модуль генерации заказов на

основании номенклатуры выпускаемой продукции, с помощью которого нужно выполнить тесты с разными вариантами исходных данных, а именно:

- с различными типоразмерами изделий и плановыми сроками изготовления;
- установить значение коэффициента перерасчёта рейтинга изделий;
- поверить работу функции размещения срочных заказов;
- проверить и исключить невыполнимые параметры заказов и расписания.

На выпускаемую продукцию существует сезонный спрос, что нужно учитывать в модели. Результат работы алгоритма может зависеть от следующих данных:

- соотношение сторон описывающего прямоугольника изделия;
- частота появления данного типоразмера в общем потоке заказов;
- зависимость времени затвердевания от площади и объема изделия;
- влияние сезонного спроса на продукцию и изменение ассортимента изделий.

В дальнейшем планируется разработать имитационную модель участка формовки, чтобы установить его максимально возможную пропускную способность и исследовать загрузку балочного крана. И на основании результатов этого исследования разработать алгоритм 3D-упаковки операций для расчёта всей производственной программы завода. Чтобы получить результаты за приемлемое время, нужно будет использовать современные методы комбинаторной оптимизации, что вызывает необходимость использовать параллельные вычисления, которые можно будет реализовать на оборудовании компании **КРОК** в рамках образовательного проекта с университетом.

Для большинства метаэвристик доказана их асимптотическая сходимость [15], что является важным доводом в пользу их активного использования. Одними из таких метаэвристик являются генетические алгоритмы, метод поиск с запретами, метод имитации отжига, роевые методы и другие. При этом генетические алгоритмы позволяют получать решения, близкие к оптимальному, быстрее, чем метод имитации отжига [21].

Из множества прикладных программ для использования эволюционных методов следует отдельно отметить **фреймворк EvoJ** [22] для языка программирования Java. Отличительной особенностью фреймворка по сравнению с другими программными пакетами научных вычислений является возможность указывать как значение параметра, так и его имя, что дает гибкость и удобство при разработке и в режиме компиляции.

Заключение

Описанные в статье алгоритмы можно включать в автоматизированные системы управления, использовать для решения задач оптимального размещения товаров и готовой продукции на складе, для загрузки транспортного средства при перевозке грузов

<http://sntbul.bmstu.ru/doc/585889.html>

и доставке продукции заказчиком. Существуют и успешно используются коммерческие программные продукты такого типа на основе данных алгоритмов, например, «[Packer3d](#)» компании ЗАО "Папер 3д", «[MaxLoad Pro](#)» компании "TOPS Software Corporation", «[2D/3D Load Packers](#)» группы разработчиков "Astrokettle Algorithms " и другие.

Решение поставленной задачи имеют практическое значение для экономии временных и материальных ресурсов при их планировании или распределении. Подход трехмерного представления операции формовки и виброусадки или "покадровый" подход, рассмотренные в статье, увеличивают производительность выполнения данной операции. Важная особенность именно этого алгоритма – это учет технологических ограничений непрерывно-дискретного производства, таких как длительность затвердевания изделия, объем готового раствора бетона и время для его использования, а также учет приоритета заказа на основе рейтинга изделия.

Разрабатываемая система планирования работ и управления заказами на заводе предоставит точную информацию о сроках изготовления изделий и выполнения заказов. При этом рациональное размещение изделий в цехе формовки увеличивает общую производительность всей производственной системы за счёт организации производства и без капитальных вложений.

Для эффективного управления предприятием необходимы соответствующие инструменты. Управление невозможно без средств контроля, а контроль, в свою очередь построен на учёте состояния и сборе информации об объектах управления и среды. Эти средства используют для анализа и прогноза любой производственной ситуации. Разрабатываемая система планирования относится именно к таким средствам и поэтому играет важную роль в автоматизации производственных процессов.

Список литературы

1. Куняев М.С., Фирсов А.С., Хоботов Е.Н. Об одном подходе к построению системы планирования работ на машиностроительном предприятии // Вестник МГТУ им.Н.Э.Баумана, серия «Машиностроение». 2009. № 4. С. 91-102
2. Поспелов А.И. Анализ одного алгоритма упаковки прямоугольников, связанного с построением расписаний для кластеров // Труды Института системного программирования РАН. 2004. Т. 6, С. 7-12
3. Сурначев М.Ю. Эволюционные алгоритмы на базе блочных технологий для решения задач упаковки контейнера: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук (05.13.18) / УГАТУ. – Уфа, 2005.

4. Псиола В.В. О приближенном решении 3-х мерной задачи об упаковке на основе эвристик // Интеллектуальные системы. – 2007. – Т. 11, № 1. – С. 83-100
5. Тоцков И.В. Модели и алгоритмы расчета параллелепипедной упаковки с использованием метода динамического перебора: Дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук (05.13.16) / УГАТУ. – Уфа, 1999. – 108 с.
6. Ягудин Р.Р. Оптимизация компоновки трехмерных геометрических объектов на основе годографа вектор-функции плотного размещения // Инженерный вестник Дона: электронный научный журнал. – 2012. – № 3. URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/921> (дата обращения: 12.04.2013).
7. Гильманова Н.А. «Мультиметодный алгоритм трехмерной упаковки с регулируемым провисанием объектов в контейнере // Информационные технологии. – 2011. – № 8. – С. 48-54.
8. Филиппова А.С. Методы решения задач ортогональной упаковки на базе технологии блочных структур: Дис. на соиск. учен. степ. док. техн. наук (05.13.18) / УГАТУ. – Уфа, 2006. – 338 с.
9. Чиглинцев А.В. Блочные модели и генетические алгоритмы в задаче поиска рациональной прямоугольной упаковки и раскроя: Дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук (05.13.18) / УГАТУ. – Уфа, 2004. – 89 с.
10. Валеева А.Ф. Конструктивные методы для решения задач ортогональной упаковки и раскроя: Дис. на соиск. учен. степ. док. техн. наук (05.13.18) / УГАТУ. – Уфа, 2006. – 265 с.
11. Филиппова А.С. Обзор методов решения задач раскроя-упаковки Уфимской научной школы Э.А. Мухачевой. Систем. требования: PowerPoint. URL: <http://www.delwin.lact.ru/smo2011/Filippova.pdf> (дата обращения: 15.04.2013).
12. Валиахметова Ю.С. Карамова Е.В. Расширение генетического алгоритма комбинирования эвристик для решения задачи прямоугольной упаковки // Вестник ВЭГУ. – 2009. – № 2(40). – С. 89-94.
13. Руднев А.С. «Алгоритмы локального поиска для задач двумерной упаковки: Дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук (05.13.18) / НГУ. – Новосибирск, 2010. – 104 с.
14. Усманова А.Р. Метод поиска с запретами для задач упаковки в контейнеры: Дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук (05.13.18) / УГАТУ. – Уфа, 2002. – 101 с.

15. Ермаченко А.И. Модели и методы решения задач прямоугольного раскроя и упаковки на базе метаэвристики "Поиск с запретами": Дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук (05.13.18) / УГАТУ. – Уфа, 2004. – 95 с.
16. Залюбовский В.В. Точные и асимптотически точные алгоритмы для задач упаковки и календарного планирования: Дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук (01.01.09) / НГУ. – Новосибирск, 2010. – 105 с.
17. М.Гэри, Д.Джонсон. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. М.: Мир, 1982. – 419 с.
18. Packing Lightmaps: упаковка текстур, описание алгоритма. URL: <http://www.blackpawn.com/texts/lightmaps/default.html> (дата обращения: 20.04.2013).
19. Rectangle Packing: описание алгоритма. URL: <http://pollinimini.net/blog/rectangle-packing-2d-packing/> (дата обращения 23.04.2013).
20. Skiena Steve S. «The algorithm design manual». London: Springer. – 2008. – 730 p.
21. Петров Ю.Ю. Применение генетического алгоритма с регуляцией вероятностей генетических операторов при решении задачи упаковки в контейнеры //сборник научн. трудов СевКавГТУ, серия «Естественнонаучная», №2, Ставрополь: СевКавГТУ, 2006.
22. Цветков П. EvoJ — удобный фреймворк для генетических алгоритмов // habrahabr.ru – издательский проект компании «Тематические медиа». URL: <http://habrahabr.ru/post/138276/> (дата обращения: 21.04.2013).